

VI CONGRESO IBÉRICO de AgroIngeniería

5 a 7 de Septiembre | 2011
Universidade de Évora | Portugal



Análisis del desplazamiento de la carga en vendimiadoras mediante el método de los elementos discretos

E.M. Báguena¹, P. Barreiro¹, A. Ramírez², C. González²

¹ Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación, ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Complutense s/n, Madrid. España. E-mail: eva.baguena@upm.es

² Grupo de investigación EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Complutense s/n, Madrid. España. E-mail: alvaro.ramirez@upm.es

Resumen

El pesado dinámico de las tolvas en una vendimiadora se ve afectado por diversas fuentes de variación. Una de ellas es el desplazamiento de la carga en su interior, debido principalmente a las inclinaciones del terreno a las que está expuesta la máquina. Este trabajo se ha realizado para cuantificar cómo se ve afectada la señal de la célula de carga en función de las inclinaciones de la máquina. El trabajo se ha dividido en dos partes: pruebas experimentales y modelización. La primera parte ha consistido en la realización de pruebas de laboratorio en las que la máquina vendimiadora, equipada con los correspondientes sensores y utilizando esferas de hidrogel como material para llenar la tolvas, fue sometida a distintas inclinaciones. En la segunda parte del trabajo se ha desarrollado un modelo de elementos discretos para simular el comportamiento de las esferas en el interior de la tolva y su efecto sobre la distribución de la carga. En un primer análisis de los datos se ha concluido que inclinaciones del terreno inferiores a 5° tendrían un efecto mínimo sobre el desplazamiento de la carga, y en consecuencia sobre la señal de la célula de carga.

Palabras Clave: célula de carga, mecanización avanzada, modelización, simulación

1. INTRODUCCIÓN

La medida de la producción superficial en cualquier cultivo requiere el desarrollo de sistemas de pesado precisos. En primer lugar, es necesario diseñar el equipo y seleccionar los sensores acordes para la adquisición de datos en cada cultivo. Los sensores de peso para cosechadoras de cereal son los que más se han desarrollado hasta el momento (Reitz and Kutzbach, 1996), si bien es cierto que las investigaciones en otros cultivos han crecido de forma importante en los últimos años (Magalhães and Cerri, 2007; Pelletier and Upadhyaya, 1999; Walter and Backer, 2003). En un estudio previo de Báguena et al. (2009) se desarrolló un sistema de pesado en dinámico a bordo de una vendimiadora. El sistema consiste en la instalación de dos células de carga bajo cada una de las tolvas de la máquina. La validación del sistema en más de 80 parcelas de viñedos dio como resultado un error de pesado de algo menos del 15% para parcelas con menos de 10.000 kg de producción y algo menor al 2% para aquellas con una producción total por encima de 20.000 kg. Al analizar los datos en detalle junto con la topografía del terreno se observó que el error era superior en parcelas con inclinación tanto longitudinal como transversal. En un estudio realizado por Fulton et al. (2009) sobre la relación entre la topografía del terreno y los datos proporcionados por un sensor de caudal másico se concluyó que ambas inclinaciones tenían un efecto sobre la señal del sensor. Por

otro lado, también se considera importante el efecto que puedan tener el desplazamiento y la composición de la carga en las tolvas debido a los cambios de inclinación.

En el sector agrícola se han desarrollado diversas aplicaciones que utilizan sistemas de visión, como en sensórica remota (Godwin and Miller, 2003), en cosechadoras (Wallays et al., 2009) o en tecnologías post-cosecha (Brosnan and Sun, 2002; Ruiz-Altisent et al., 2010). Los sistemas de visión permiten determinar el tamaño, color o textura de los objetos, así como sus atributos numéricos. Por ello se ha considerado la posibilidad de utilizar estas técnicas para identificar la composición y el desplazamiento del material dentro de las tolvas de la vendimiadora.

Con objeto de entender en profundidad los efectos observados en este trabajo se propone el empleo de un modelo de elementos discretos, DEM (Cundal and Strack, 1979), que simule el comportamiento de la carga en el interior de la tolva. El modelo de elementos discretos está basado en el modelo de contacto de Hertz-Mindlin (Tsuji et al., 1992) tanto para las interacciones entre partículas como para aquellas entre partículas y pared.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio consta de 2 fases: trabajo experimental y modelado y simulación.

Durante la primera fase de trabajo llevada a cabo en KU Leuven se llevaron a cabo los ensayos de laboratorio consistentes en colocar, en un banco de ensayos de vibraciones, una vendimiadora New Holland VL6080 equipada con una célula de carga, AEP C3S 2.500 kg (AEP transducers, Italia), que fue instalada bajo la tolva derecha, de la misma forma que se había hecho durante los ensayos de campo descrito por Baguena et al. (2009). La célula de carga fue instalada junto con una electrónica específica y calibrada para ésta, TA4/2 (AEP transducers, Italia). La señal de la célula de carga fue recogida con una tarjeta de adquisición de datos NIDAQ 6024E (National Instruments, EEUU). En la viga principal de la vendimiadora se instaló además un inclinómetro biaxial, Turck BA25-Q20L60/S320/DE (Turck, Alemania), para medir las inclinaciones tanto longitudinal como transversal de la máquina.

Dado que los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo en Bélgica en Abril de 2010 y no se disponía de uvas para tal efecto, se utilizaron esferas de hidrogel, cuyo radio fuerza-deformación ejercido con el dedo (N/mm) y cuyo módulo de elasticidad son similares a los de un grano de uva.

Para simular las inclinaciones del terreno la máquina fue ubicada en una plataforma movida por cuatro cilindros hidráulicos (Anthonis et al., 2006; Coen et al., 2010). La frecuencia del movimiento fue de 1,5 Hz (ondas sinusoidales) con una amplitud de 0,5 cm en el plano vertical. La tolva se cargó con 75 kg de esferas de hidrogel y se llevó la máquina a distintas inclinaciones: 0°, -10°, 0°, 10°.

El desplazamiento de la carga fue caracterizado utilizando análisis de imagen sobre videos grabados durante los distintos itinerarios de la máquina: de posición delantera a horizontal, de horizontal hacia detrás, de detrás a horizontal, y de horizontal hacia delante. Los videos fueron cargados en Matlab con formato avi y posteriormente las imágenes de dichos videos fueron salvadas en espacio de color rgb. Dado que las esferas eran rojas, se seleccionaron aquellos valores de rojo superiores a 0,5 para la segmentación de la carga. Para evitar analizar zonas sombreadas, se escogió el eje mayor de la tolva y se dividió la imagen de ésta en cuatro cuadrantes. Sólo los dos cuadrantes inferiores no presentaban sombras, por lo que se realizó sobre los histogramas de estos datos un Análisis de Componentes principales (PCA).

La segunda fase de trabajo se ha realizado en la Universidad Politécnica de Madrid y ha consistido en el empleo de un modelo de elementos discretos, DEM, para simular el comportamiento de la carga en el interior de la tolva. Los parámetros del material que han sido empleados en la definición de este modelo se han determinado experimentalmente en el caso de la densidad real de las partículas, el módulo de elasticidad y el coeficiente de restitución partícula-pared, y se ha estimado el resto de valores a través de la observación macroscópica de las partículas reales. Por otro lado, las partículas de hidrogel se han simulado mediante esferas simples, empleándose una distribución de tamaños de carácter normal. Los valores de diámetro medio ($d = 16,17$ mm) y de la desviación típica ($\sigma = 1,3$ mm) que la caracterizan fueron obtenidos del análisis estadístico de un conjunto suficientemente amplio de partículas reales. El modelo DEM se ha generado con el programa comercial EDEM 2.3 (2011).

El modelo de elementos discretos representa tanto la geometría tridimensional de la tolva como las partículas de hidrogel contenidas en su interior, reproduciéndose lo más fielmente posible el itinerario de movimientos considerados durante los ensayos. Al inicio de la simulación (Fig. 1), estando la tolva en posición horizontal, todas las partículas necesarias son generadas de forma progresiva a través de una pequeña superficie cuadrada localizada sobre la parte trasera de la tolva. Al igual que en los experimentos, la masa de partículas empleada es de 75 kg. Una vez que las partículas alcanzan una situación estática, la tolva comienza a inclinarse hacia adelante o hacia atrás siguiendo el mismo esquema que el descrito para la situación experimental. En la escala temporal de la Fig. 1 se muestran diferentes imágenes representativas de los diferentes estados alcanzados. La velocidad de rotación empleada (0,035 rad/s) es ligeramente superior a la empleada en los ensayos.

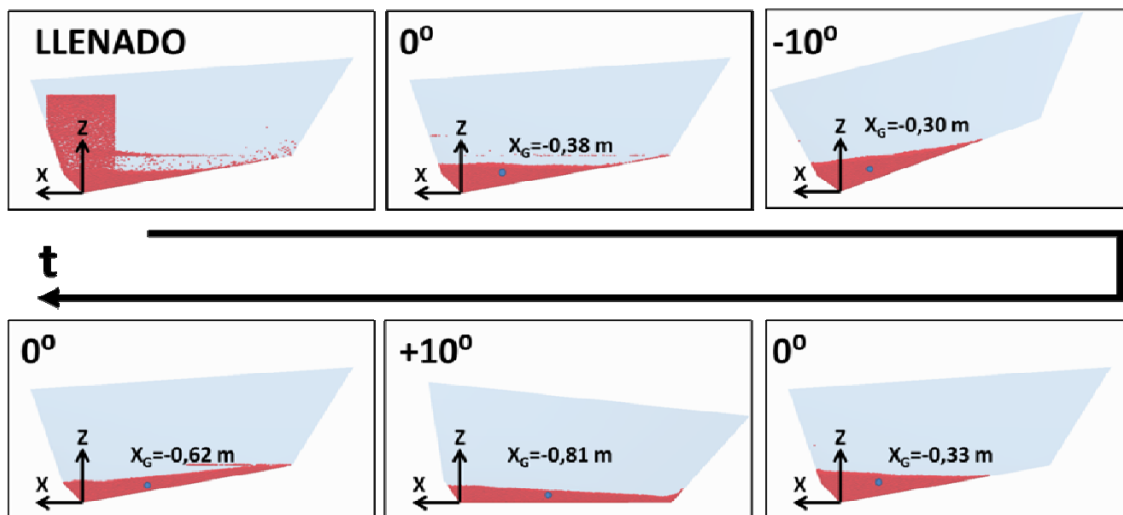


Figura 1. Movimientos de la tolva realizados con el modelo DEM

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos al calcular los pesos medios para cada posición de la máquina cuando ésta se inclina longitudinalmente. Cada valor corresponde a la media de 400 medidas (para cada posición). Los valores de inclinación positiva corresponden a la máquina inclinada hacia delante y los negativos a la máquina inclinada hacia detrás, mientras

que los valores en torno a cero corresponden a la posición horizontal de la máquina. El hecho de que haya dos valores en torno a cero es debido a que se pretenden visualizar los resultados en posición horizontal tanto cuando la máquina procede de inclinación hacia delante, como cuando retorna de una inclinación hacia atrás. La Fig. 2 muestra el efecto del desplazamiento de la carga sobre el sistema de pesado. El ajuste correspondiente a una ecuación de segundo grado es de $r^2=0,9268$. En la Fig. 2 se observa también que la desviación estándar para cada valor es de $\pm 1,7$ kg, y el error estándar asociado es $\pm 0,0894$ kg. A pesar de que el peso se mantuvo constante a lo largo de todo el ensayo (para todas las posiciones de la máquina), el peso registrado por la célula de carga cambió con la posición. Éste decreció en torno al 8% de la posición horizontal a la posición delantera y en torno al 21% de la horizontal a la posición trasera. El hecho de que el peso máximo corresponda a la posición horizontal es debido a que el centro de gravedad está mejor alineado con el eje de la célula de carga. La línea punteada de la Fig. 2 muestra el efecto de la inclinación de la máquina sobre la señal de la célula de carga asumiendo una carga estacionaria en la tolva.

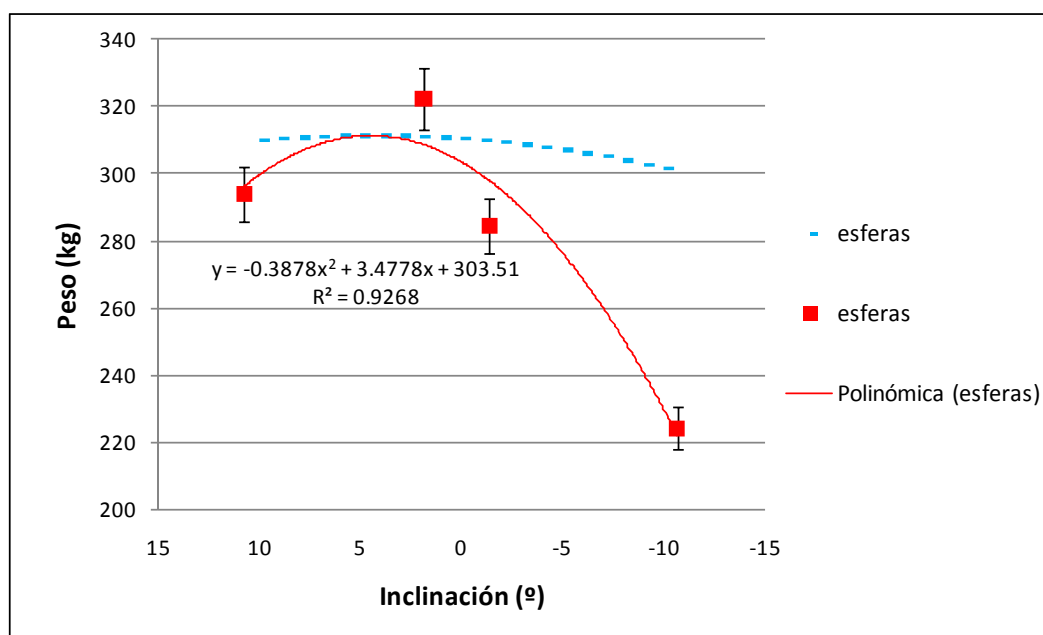


Figura 2. Valores medios de peso para las cuatro posiciones de la máquina

La Fig. 3 muestra la relación entre la inclinación de la máquina y el cambio de longitud de la carga en la tolva como función del movimiento en superficie (calculado como el eje mayor del objeto, carga de la tolva, identificado con técnicas de análisis de imagen en Matlab). Cuando la máquina se mueve hacia delante la longitud decrece, mientras que cuando la máquina se mueve hacia detrás dicha longitud crece. La Fig. 3 muestra también que el área comprendida entre las curvas indica una histéresis en el movimiento de la carga, no siendo exactamente reproducible cuando se mueve de delante hacia detrás y viceversa.

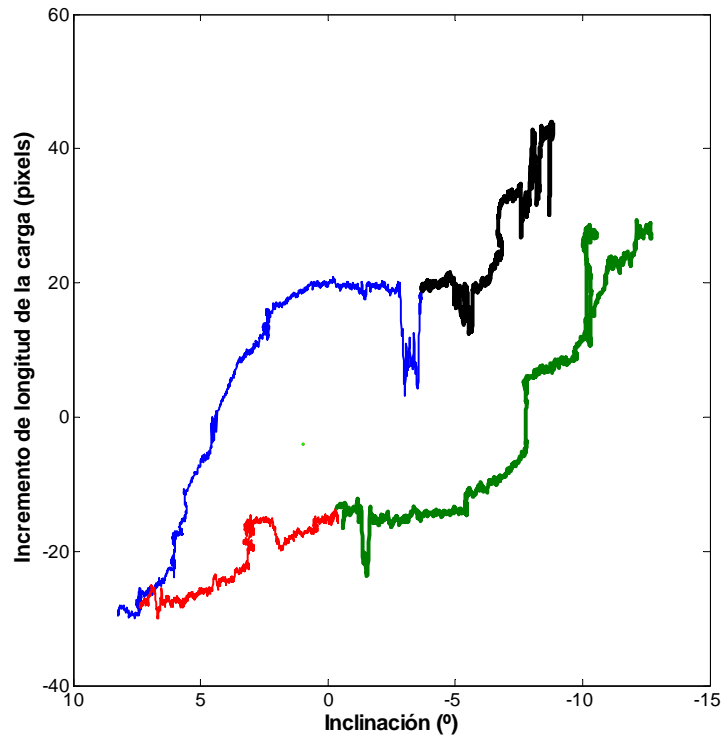


Figura 2. Longitud de la carga en la tolva durante el movimiento de la máquina hacia distintas posiciones

La predicción realizada por el modelo DEM para el movimiento de las partículas en los distintos puntos del itinerario ha sido cualitativamente similar a lo observado durante los experimentos. Asumiendo de este modo que el modelo es suficientemente representativo de la realidad, se emplearon los resultados numéricos derivados de él para estudiar en profundidad algunas fenómenos observados experimentalmente. En primer lugar se estudió la evolución de la posición del centro de gravedad de las partículas almacenadas a lo largo del itinerario de movimientos (Fig. 3). La obtención de esta posición es inmediata al conocerse en cualquier instante de tiempo las coordenadas (según el sistema de referencia de la Fig. 3) y la masa de cada una de las partículas. Este estudio sirvió de base para analizar los valores de carga asumidos por la célula de carga en cada uno de esos instantes. Esta carga es la denominada como $F1Z$ en la Fig. 3 y su valor resulta del establecimiento del equilibrio de fuerzas mostrado dicha figura. En este equilibrio interviene el peso de las partículas almacenadas ($P = 75 \text{ kg}$), localizada en el centro de gravedad previamente calculado, y las fuerzas desarrolladas en los puntos de unión de la tolva con la célula de carga ($F1X$ y $F1Z$) y con el brazo del hidráulico que sostiene la tolva en su parte anterior ($F2X$ y $F2Z$).

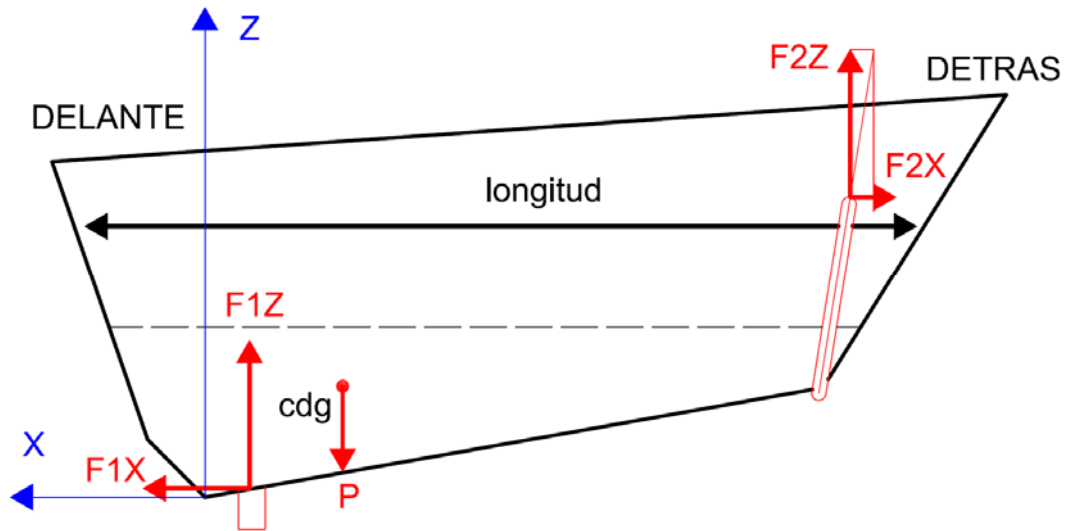


Figura 3. Esquema general de la tolva

La Fig. 4 muestra la longitud superficial de la carga en la tolva en función de la inclinación longitudinal durante la simulación del movimiento. Al comparar esta imagen con la Fig. 2 se puede observar la similitud entre ambas, existiendo un incremento de longitud mucho más pronunciado a partir de $\pm 5^\circ$. En el caso de la Fig. 4 los tramos verticales que se observan en 0° y -10° se deben a que durante la simulación se consideró un periodo de tiempo en el que la máquina estaba fija en una posición.

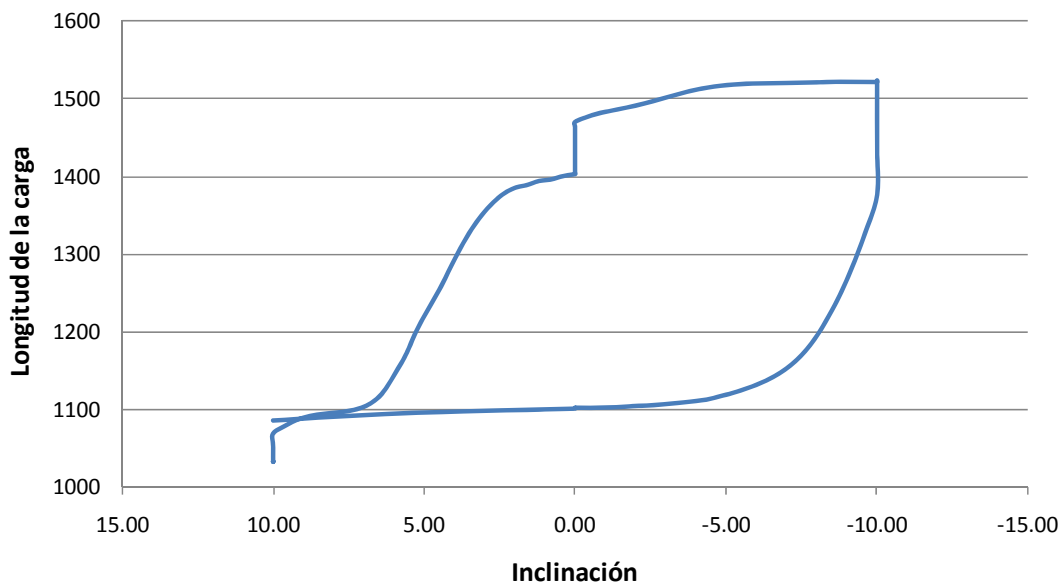
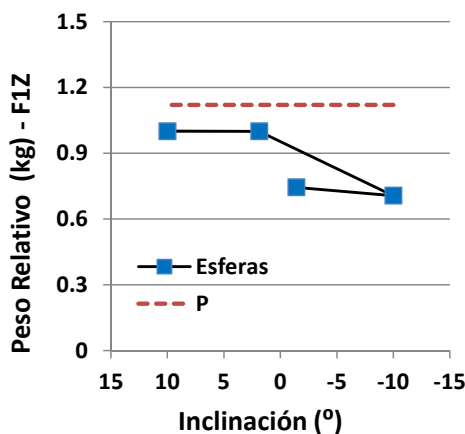


Figura 4. Longitud simulada de la carga en la tolva para distintas posiciones de la máquina

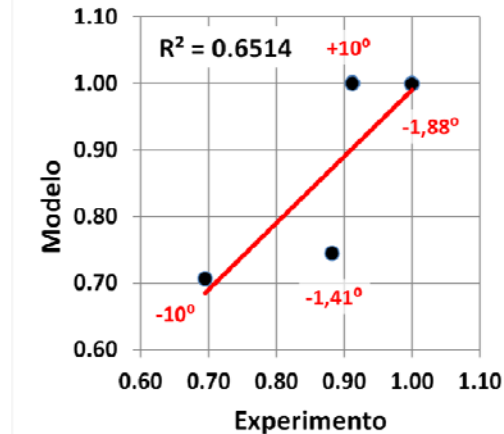
En la Fig. 5a se muestra la predicción numérica del peso de la tolva expresado en porcentaje respecto a la posición cero realizada para el valor del F1Z (carga vertical soportada en la célula de carga) para cuatro valores discretos de inclinación (10° – $1,88^\circ$ – $-1,41^\circ$ – -10°) coincidentes con los representados en la Fig. 2 para el caso experimental. Cuando la tolva se inclina hacia atrás ($-1,41^\circ$ y -10°) la predicción numérica obtenida es cualitativamente similar

a la observada experimentalmente. En estos casos se presenta una reducción de la carga medida por la célula de carga como consecuencia del desplazamiento experimentado por el centro de gravedad hacia la derecha (Fig. 1). Este hecho provoca que el brazo hidráulico que sostiene la tolva en la parte trasera asuma una mayor de carga vertical (F2Z), reduciéndose consiguientemente el valor de F1Z. Sin embargo, cuando la tolva se inclina hacia la parte delantera (10°), los resultados numéricos no muestran variaciones apreciables respecto de la posición horizontal. En este caso la distribución de partículas varía mínimamente (Véase las tres primeras posiciones ($0^\circ - 10^\circ - 0^\circ$) de la Fig. 1), de modo que el centro de gravedad tampoco modifica notablemente su posición. Esta situación no es la observada experimentalmente, donde también se aprecia una reducción de la carga medida por la célula de carga cuando la tolva se inclina hacia adelante. Este hecho puede explicarse por la aparición de ciertos efectos colaterales debidos al apoyo entre la tolva y la célula de carga que conducen a errores en la medida del valor de la carga vertical.

Finalmente, en la Fig. 5b se muestra una comparación de los valores obtenidos numéricamente para F1X y los valores medidos experimentalmente con la célula de carga. Esta comparación se ha hecho en términos relativos, calculándose para cada inclinación de la tolva la relación entre el valor de carga vertical correspondiente a esta inclinación y el valor máximo de la carga vertical medida en cualquier inclinación. Así en la Fig. 5b se enfrentan los valores obtenidos numérica y experimentalmente, resultando un coeficiente de correlación lineal de $R^2=0,6514$. A la vista de estos resultados puede considerarse como aceptable el grado de aproximación obtenido a través de la simulación.



(a)



(b)

Figura 5. a) Predicción numérica del peso (F1Z) soportado por la célula de carga en función de la inclinación.
b) Comparación de los resultados obtenidos numérica y experimentalmente

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de cualquier sistema de pesado en dinámico exige un estudio exhaustivo de las fuentes de variación debidas al desplazamiento del vehículo y de la carga. En este trabajo se han sentado las bases experimentales y de modelado que permitirán refinar el diseño actual disponible para el pesado en dinámico en tolvas de vendimiadoras.

El modelado y simulación mediante elementos discretos ha resultado muy relevante en la explicación de las fuentes de variación observadas experimentalmente.

La combinación en la adquisición de señales de video digital, inclinación de alta resolución y pesado dinámico junto con los resultados de simulación del modelo de elementos discretos, será empleada para establecer el límite de precisión del sistema de pesado en campo.

En un primer análisis, inclinaciones inferiores a 5° (8,75%) suponen un mínimo efecto sobre el desplazamiento de la carga.

5. AGRADECIMIENTOS

La parte experimental de este trabajo fue llevada a cabo en la universidad KU Leuven (Bélgica) y Case New Holland en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid a través de una beca del Consejo Social. Los autores agradecen el trabajo de los técnicos del departamento Biosystems por su apoyo y cooperación. Los fondos para el trabajo posterior han sido cubiertos por los grupos de investigación LPF-TAGRALIA y EIPIRMA, junto con la Universidad Politécnica de Madrid.

6. BIBLIOGRAFIA

- Baguena, E., P. Barreiro, C. Valero, X. Sort, M. Torres, and J.M. Ubalde. 2009. *On-the-go yield and sugar sensing in grape harvester*, pp. 273-278, In D. G. a. C. L. E.J. van Henten, (ed.) *Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture*. Wageningen Academics Publishers The Netherlands.
- Brosnan, T., and D.-W. Sun. 2002. *Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems--a review*. *Computers and Electronics in Agriculture* 36:193-213.
- Cundal, P., and O. Strack. 1979. *A discrete numerical model for granular assemblies*. *Geotechnique* 29 (2):47-65.
- EDEM 2.3 User Guide. DEM Solutions, Ltd., Edinburgh, Scotland, UK. Copyright © 2011
- Fulton, J.P., C.J. Sobolik, S.A. Shearer, S.F. Higgins, and T.F. Burks. 2009. *Grain Yield Monitor Flow Sensor Accuracy for Simulated Varying Field Slopes* 25:15-21.
- Godwin, R.J., and P.C.H. Miller. 2003. *A Review of the Technologies for Mapping Within-field Variability*. *Biosystems Engineering* 84:393-407.
- Magalhães, P.S.G., and D.G.P. Cerri. 2007. *Yield Monitoring of Sugar Cane*. *Biosystems Engineering* 96:1-6.
- Pelletier, G., and S.K. Upadhyaya. 1999. *Development of a tomato load/yield monitor*. *Computers and Electronics in Agriculture* 23:103-117.
- Reitz, P., and H.D. Kutzbach. 1996. *Investigations on a particular yield mapping system for combine harvesters*. *Computers and Electronics in Agriculture* 14:137-150.
- Ruiz-Altisent, M., L. Ruiz-Garcia, G.P. Moreda, R. Lu, N. Hernandez-Sanchez, E.C. Correa, B. Diezma, B. Nicolaï, and J. García-Ramos. 2010. *Sensors for product characterization and quality of specialty crops--A review*. *Computers and Electronics in Agriculture* 74:176-194.
- Tsuji, Y., T. Tanaka, and T. Ishida. 1992. *Lagrangian numerical-simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe*. *Powder Technology* 71:239-250.
- Walter, J.D., and L.F. Backer. 2003. *Sugarbeet Yield Monitoring for Site-Specific Farming Part I--Laboratory Tests and Preliminary Field Tests*. *Precision Agriculture* 4:421-431.

Wallays, C., B. Missotten, J. De Baerdemaeker, and W. Saeys. 2009. *Hyperspectral waveband selection for on-line measurement of grain cleanness*. *Biosystems Engineering* 104:1-7.